

## 光质对当归生长特性、主要活性物质积累及关键基因表达的影响

王佳明<sup>1</sup>, 苏红彦<sup>2</sup>, 李霞<sup>2</sup>, 吴淑婧<sup>2</sup>, 赵艳<sup>3</sup>, 栗孟飞<sup>1,2\*</sup>

1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070

2. 甘肃农业大学农学院 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070

3. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201

**摘要:** **目的** 研究适宜当归 *Angelica sinensis* 生长和活性物质积累的光质处理, 为调控当归生长和代谢产物积累提供参考。**方法** 对当归盆栽植株进行 3 种光质处理 (红光、蓝光和红外光), 以白光为对照 (CK), 测定植株生长特性、主要活性物质含量及关键基因表达水平。**结果** 不同光质对当归生长特性、主要活性物质积累和关键基因表达存在较大差异; 与 CK 相比, 蓝光显著促进株高、根长、叶绿素含量、气孔开度, 红光和红外光在一定程度上可促进某一生长参数 (如株高和地上干质量), 但蓝光、红光和红外光对生物量积累不显著; 红光显著促进可溶性糖积累, 蓝光显著促进总黄酮积累, 而红外光显著促进阿魏酸、藜内酯、总酚类积累和体外抗氧化能力; 3 种光质处理均可促进主要活性物质 (阿魏酸、黄酮类、挥发油及多糖类) 生物合成多数相关基因表达水平, 比如, 参与阿魏酸生物合成的咖啡酸 3-O-甲基转移酶 (caffeic acid 3-O-methyltransferase, *COMT*) 基因在蓝光处理最为显著, 参与黄酮类生物合成的查耳异构酶 2 (chalcone isomerase 2, *CHI2*) 基因在红外光处理最为显著, 参与挥发油类生物合成的 1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸合成酶 (1-deoxy-D-xylulose 5-phosphate synthase, *DXS*) 基因在红光处理最为显著。**结论** 单色光质 (蓝光、红光和红外光) 对当归生长和主要活性物质积累存在特异性效应, 因此, 对复合光调控当归生长和代谢产物积累效应需进一步研究。

**关键词:** 当归; 不同光质; 生长特性; 活性物质积累; 基因表达

中图分类号: R283

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2026)07-2730-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.07.024

## Effect of light quality on growth characteristics, main active substances accumulation, and key genes expression of *Angelica sinensis*

WANG Jiaming<sup>1</sup>, SU Hongyan<sup>2</sup>, LI Xia<sup>2</sup>, WU Shujing<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>3</sup>, LI Mengfei<sup>1,2</sup>

1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. National Key Laboratory of Aridland Crop Science, College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

**Abstract: Objective** To find out the optimal light quality for plant growth and bioactive metabolites accumulation of *Angelica sinensis*, and provide references for regulating the growth and metabolites product accumulation of *A. sinensis*. **Methods** The *A. sinensis* plants grown in pots were exposed to three different light qualities (red, blue, and infrared light) with white light as the control (CK), the growth characteristics of plants, contents of main bioactive metabolites, and expression level of key genes were determined. **Results** There were significant differences in the growth characteristics, main bioactive metabolites accumulation, and key genes expression of *A. sinensis* under different light qualities. Compared with the CK, blue light significantly promoted plant height, root length, chlorophyll content, and stomatal aperture; red light and infrared light could promote some growth parameters (e.g., plant height and aerial parts dry weight) to some extent; however, the blue, red, or infrared light had no significant effect on biomass accumulation. Red light significantly promoted soluble sugar accumulation, blue light significantly promoted total flavonoids accumulation, while infrared light significantly promoted accumulation of ferulic acid, ligustilide and total phenolics as well as *in vitro* antioxidant capacity. The three light qualities could promote the expression levels of almost genes related to the biosynthesis of main bioactive metabolites

收稿日期: 2025-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32360100); 国家自然科学基金资助项目 (32160083); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-21); 云南省科技计划项目 (202304B1090009); 甘肃省科技重大专项 (23ZDNK002); 甘肃省重点研发计划 (22YF7NA111)

作者简介: 王佳明 (2000—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事药用植物生物学方面研究。E-mail: wangjm202311@163.com

\*通信作者: 栗孟飞 (1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 教授, 主要从事药用植物资源与利用方面研究。E-mail: lmf@gsau.edu.cn

(i.e., ferulic acid, flavonoids, volatile oils, and polysaccharides); for example, the caffeic acid 3-*O*-methyltransferase (*COMT*) gene involved in ferulic acid biosynthesis showed the highest upregulation under blue light, the chalcone isomerase 2 (*CHI2*) gene involved in flavonoid biosynthesis was significantly upregulated under infrared light; and the 1-deoxy-*D*-xylulose 5-phosphate synthase (*DXS*) gene involved in volatile oil biosynthesis was significantly upregulated under red light. **Conclusion** Monochromatic light qualities (blue, red, and infrared light) presented specific effects on the growth and main bioactive metabolites accumulation in *A. sinensis*, thus, the regulatory effect of combined lights on the growth and metabolites accumulation requires further study.

**Key words:** *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels; different light quality; growth characteristics; bioactive metabolites accumulation; gene expression

当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 为我国常用大宗中药材, 主要种植于我国甘肃、青海和云南省等高寒阴湿区域, 其干燥根具有补血活血、调经止痛、润肠通便等传统功效<sup>[1]</sup>。化学研究发现, 当归成药根中含有有机酸类、挥发油类、黄酮类、酚类、多糖等多种化学成分, 其具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤、免疫调节等现代药理作用<sup>[2-3]</sup>。研究发现, 通过调控外界生长环境可促进当归生长和代谢产物积累。比如, 当归生长特性(如根生物量和根外型)和主要活性物质(如阿魏酸、藁本内酯、挥发油类和黄酮类等化合物)积累与海拔高度(2 000~3 000 m)呈现显著正相关<sup>[4-5]</sup>。适宜低温(10~15 °C)显著促进当归生长特性(如根生物量、根长、叶片厚度、叶绿素含量等)和主要活性物质(如阿魏酸、藁本内酯、黄酮类和多糖等化合物)积累, 以及阿魏酸和黄酮类化合物生物合成相关基因[如苯丙胺解氨酶(phenylalanine ammonia lyase 1, *PAL1*)、肉桂酰辅酶 A 还原酶(cinnamoyl CoA oxidoreductase, *CCR*)和查耳酮合酶(chalcone synthase, *CHS*)等]的高表达<sup>[6]</sup>。适度遮阳(50%~75%)可提高当归产量和阿魏酸积累<sup>[7]</sup>; 单一 UV-B 显著抑制当归植株生物量、叶绿素含量和气孔开度等<sup>[8]</sup>, 但有利于苯酞类化合物的积累<sup>[9]</sup>, 而白光[100 μmol/(s·m<sup>2</sup>)]+UV-B (107 μW/m<sup>2</sup>)有利于主要活性物质(如阿魏酸、藁本内酯、黄酮类和多糖类等化合物)积累, 以及阿魏酸、黄酮类、挥发油类和多糖类化合物生物合成相关基因的高表达<sup>[8]</sup>。

大量研究表明, 利用 LED 光质(如红光、蓝光、红外光和 UV-B)可调控药用植株生长、活性物质积累及基因表达网络<sup>[10]</sup>。到目前为止, 尽管利用 UV-B 辐射调控当归产量和品质等方面已有研究报道<sup>[8-9]</sup>, 但其他光质(红光、蓝光和红外光)对当归生长和代谢产物积累的调控机制还未见报道。当归主要药效成分从苗期到根膨大期快速持续上升, 到成药期和收获期缓慢下降, 且营养生长期关键酶基因(*GA20x6*、*GA20ox1*)均上调表达<sup>[11-12]</sup>。因此, 为探

究不同光质对当归营养生长期生长的影响, 以当归盆栽植株为材料, 利用组织切片、HPLC 和 qRT-PCR 等技术和方法, 对 3 种单一光质(红光、蓝光和红外光)处理下的植株生长特性(如生物量、叶绿素含量、气孔开度等)、主要活性物质(如阿魏酸、藁本内酯和黄酮类等化合物)含量及其生物合成的相关基因表达水平进行测定与分析, 旨在找到适宜当归生长和活性物质积累的光质处理, 为调控当归生长和代谢产物积累提供参考。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料

对照品阿魏酸(批号 SF8030)、藁本内酯(批号 SL8120)购自北京索莱宝科技有限公司, 质量分数均大于 98%。对照品儿茶素、没食子酸为实验室自制, 质量分数大于 98%。药材经甘肃农业大学栗孟飞教授鉴定为伞形科植物当归 *A. sinensis* (Oliv.) Diels。

### 1.2 仪器

KD-2258 型轮转切片机(Cody 公司); RVL-100-G 型正倒置一体荧光显微镜(ECHO 公司); SMF01 型粉碎机(浙江苏泊尔股份有限公司); 1902805S 型超声破碎仪(超声清洗机, 宁波新芝生物股份有限公司); MSP-1S 型离子喷射仪(Vacuum Device Inc 公司); S-3400N 型扫描电子显微镜(Hitachi 公司); BIO-DL 型超微量分光光度计(Micro Drop 公司); T6 新世纪分光光度计(北京普析通用仪器有限公司)。高效液相色谱仪(Waters 公司, 美国)。

## 2 方法

### 2.1 植株的处理

选择根直径 0.4~0.5 cm 当归种苗(3 年生成熟种子育苗), 2024 年 3 月初移栽至花盆(17 cm×20 cm, 2 株/盆; 营养基质有机含量>98%), 置于 23 °C、光(12 h)/暗(12 h)、光强 50 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、空气相对湿度 50%条件下生长。30 d 后选择长势一致的植株, 分 4 组进行不同光质处理(温度 20 °C、相对湿度 50%), 每组 20 盆(2 株/盆, 20 个重复, 40 株)。白

光(对照CK): 400~760 nm 光(12 h)/暗(12 h), 红光: 660 nm 光(12 h)/暗(12 h), 蓝光: 450 nm 光(12 h)/暗(12 h), 红外光: 720 nm 光(12 h)/暗(12 h), 调节光源与幼苗的距离, 使光照强度在各处理组中保持一致, 均为  $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光照处理 15 d 后, 20 株用于测定株高、根长、干质量、叶绿素含量、观察叶片组织结构, 其余 20 株用于测定主要活性物质含量、体外抗氧化能力、基因表达水平等。

## 2.2 生长特性和叶绿素含量测定

取不同光质处理后的植株 10 盆 20 株, 测定株高、根长、地上和地下部分鲜质量、以及阴干后的地上和地下部分干质量。叶绿素含量测定参考李合生等<sup>[13]</sup>方法, 其中, 取功能叶片 0.05 g 制备提取液, 使用可见分光光度计分别于 665 和 649 nm 下测定叶绿素 a 和叶绿素 b 吸光值 ( $A$ ), 以 95%乙醇为空白对照, 按照公式计算叶绿素 a 和叶绿素 b 含量。

$$\text{叶绿素 a 含量} = (13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}) \times V \times 10^{-3} / M$$

$$\text{叶绿素 b 含量} = (24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665}) \times V \times 10^{-3} / M$$

$V$  为提取液体积,  $M$  为制备提取液材料鲜质量

## 2.3 叶片组织结构观察

**2.3.1 石蜡切片观察** 采用石蜡切片法观察叶片组织结构<sup>[14]</sup>。第 1 步: 清洗叶片, 用滤纸吸干表面水分, FAA 固定液 (50%乙醇-甲醛-冰乙酸=90:5:5) 固定, 4 °C 浸泡 12 h; 第 2 步: 将 FAA 固定的叶片用 70%乙醇洗涤 3 次 (每次 10 min), 然后在 30% (4 h)、50% (4 h)、70% (3 h)、85% (3 h)、95% (2.5 h)、100% (2 h) 和 100% (1.5 h) 乙醇中逐级脱水; 第 3 步: 将脱水的叶片在乙醇和二甲苯混合物中依次以比例 2:1、1:1、1:1、1:2 和 0:1 透明化 2 h; 第 4 步: 将透明后的叶片在二甲苯和石蜡混合物中依次以比例 1:1 和 2:2 56 °C 下浸泡 12 h, 石蜡中 58 °C 浸泡 3 次 (每次 12 h), 然后包埋在 2 cm 石蜡块中; 第 5 步: 使用轮转切片机将包埋样品切成 7  $\mu\text{m}$  的蜡片, 番红-固绿染色后, 使用正倒置一体荧光显微镜观察叶片组织结构。

**2.3.2 扫描电镜观察** 采用真空冷冻干燥法观察叶片表面结构特征<sup>[15]</sup>。叶片用 2.5%戊二醛在 4 °C 固定 12 h, 然后用 0.1 mol/L PBS (pH 7.2) 漂洗 3 次 (每次 10 min), 再用乙醇进行梯度脱水: 50%乙醇 (15 min)、70%乙醇 (15 min)、80%乙醇 (15 min)、90%乙醇 (15 min)、无水乙醇 (30 min, 3 次), 脱水后的叶片用 100%叔丁醇置换 2 次 (每次 15 min), 冷冻干燥机干燥 1 h。干燥后的叶片远轴面 (即腹

面) 朝上, 离子喷射仪喷金处理后, 使用扫描电子显微镜观察叶片表面结构特征。

## 2.4 主要活性成分含量测定

**2.4.1 供试品溶液的制备** 取阴干的当归根, 置于粉碎机中粉碎至粉末, 准确称取 0.5 g 粉末, 置于 50 mL 离心管, 加入 15 mL 无水乙醇, 室温下用超声破碎仪超声 (功率 100%、频率 40 kHz) 提取 2 h, 提取液在 4 °C、5 000 r/min 离心 10 min, 上清液用无水乙醇定容至 20 mL, 置于 4 °C 保存, 用于阿魏酸、藁本内酯、可溶性糖、总黄酮、总酚类、抗氧化能力等测定。

**2.4.2 对照品溶液的制备** 精密称取阿魏酸和藁本内酯各 5.0 mg, 色谱甲醇溶解并定容至 5.0 mL 量瓶中, 分别制成 1.0 mg/mL 的对照品储备液; 根据实际检测需求, 将每个对照品储备液吸取 0.25 mL 于 5 mL 量瓶中, 并用色谱甲醇定容, 即可得质量浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的混合对照品溶液, 于 4 °C 下保存备用。

**2.4.3 色谱条件<sup>[16]</sup>** 将供试品溶液过 0.22  $\mu\text{m}$  有机滤膜, 使用高效液相色谱仪 (Waters ACQUITY Arc, 美国), 色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C<sub>18</sub> (250 mm  $\times$  4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ ), 以 1.0%乙酸 (A) 溶液-乙腈 (B) 为流动相 (梯度洗脱: 0~4 min, 30%~45% B; 4~5 min, 45%~47% B; 5~6 min, 47%~50% B; 6~8 min, 50%~80% B; 8~10 min, 80%~90% B; 10~14 min, 90%~30% B), 进样量 10  $\mu\text{L}$ , 体积流量为 1.0 mL/min, 柱温 30 °C, 波长 323 nm。色谱图见图 1。

**2.4.4 线性回归方程的绘制** 精密吸取“2.4.2”项下混合对照品溶液, 用色谱甲醇稀释成梯度为 (50、25、10、5、2.5、1.25  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 的对照品溶液。按照

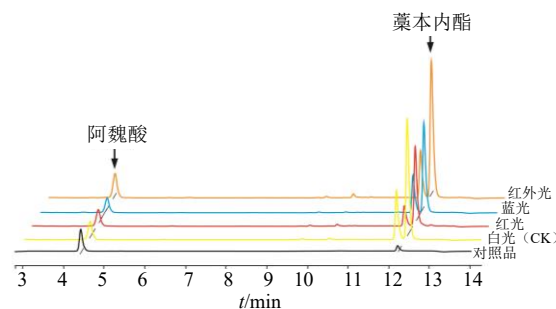


图 1 混合对照品溶液和不同光质处理的供试品溶液 HPLC 色谱图

Fig. 1 HPLC of mixed reference standards and samples treated with different light qualities

“2.4.3”项下的色谱条件方法制备,以对照品质量浓度为横坐标( $X$ ),峰面积为纵坐标( $Y$ )绘制标准曲线,得线性回归方程,结果见表1。

表1 线性回归方程  
Table 1 Linear regression equations

化合物	回归方程	$r^2$	线性范围/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$
阿魏酸	$Y=52.645X+40.309$	0.995 4	1.25~50.00
藜本内酯	$Y=11.181X+11.739$	0.998 2	1.25~50.00

**2.4.5 精密度试验** 精密称取样品粉末,按照“2.3.1”项下方法制备,“2.4.3”项下色谱条件连续进样6次,计算得到阿魏酸和藜本内酯的相对峰面积,RSD分别为2.48%、2.09%。

**2.4.6 稳定性试验** 精密称取样品粉末,按照“2.3.1”项下方法制备,“2.4.3”项下色谱条件分别在0、2、4、8、12、24h测定阿魏酸和藜本内酯的相对峰面积,RSD值分别为1.27%、1.33%。

**2.4.7 重复性试验** 精密称取样品粉末6份,按照“2.4.1”项下方法制备,“2.4.3”项下色谱条件测定阿魏酸和藜本内酯的质量分数,RSD值分别为1.25%、2.23%。

**2.4.8 加样回收率试验** 取本品粉末0.25g,精密称定,平行6份,分别精密加入与样品中含量相当的阿魏酸和藜本内酯,按“2.4.1”项下方法制备供试品溶液,并计算平均加样回收率及RSD,阿魏酸和藜本内酯的回收率分别为103.16%、99.81%,RSD值分别为1.55%、5.81%。

## 2.5 可溶性糖含量测定

采用硫酸-苯酚法<sup>[17]</sup>测定可溶性糖含量。其中,提取液加样量30 $\mu\text{L}$ ,以蔗糖为标准品进行标定,按照公式计算可溶性糖含量。

$$\text{可溶性糖含量}=(C\times V_2)/(V_1\times M\times 1000)$$

$C$ 为可溶性糖的量, $V_1$ 为吸取样品溶液的体积, $V_2$ 为提取液的体积, $M$ 为材料的干物质质量

## 2.6 总黄酮含量测定

采用 $\text{NaNO}_2\text{-AlCl}_3\text{-NaOH}$ 法<sup>[18]</sup>测定总黄酮化合物含量。其中,提取液加样量300 $\mu\text{L}$ ,以儿茶素为对照品标定,按照公式计算总黄酮含量。

$$\text{总黄酮含量}=(C\times V_2)/(V_1\times M\times 1000)$$

$C$ 为总黄酮的量, $V_1$ 为吸取样品溶液体积, $V_2$ 为提取液体积, $M$ 为制备提取液材料干质量

## 2.7 总酚含量测定

采用福林酚试剂法<sup>[19]</sup>测定总酚类化合物含量。其中,提取液加样量90 $\mu\text{L}$ ,以没食子酸为对照品

标定,按照公式计算总酚含量。

$$\text{总酚含量}=(C\times V_2)/(V_1\times M\times 1000)$$

$C$ 为总酚类的量; $V_1$ 为吸取样品溶液体积, $V_2$ 为提取液体积, $M$ 为制备提取液的材料干质量。

## 2.8 体外抗氧化能力测定

采用1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和铁离子还原/氧化能力(ferric reducing/antioxidant power, FRAP)2种方法<sup>[20-21]</sup>测定体外抗氧化能力。在DPPH法中,提取液加样量80 $\mu\text{L}$ ;在FRAP法中,提取液加样量60 $\mu\text{L}$ ,样品溶液抗氧化能力以500 $\mu\text{mol/L}$ ( $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )为参比。按照公式计算DPPH清除率和FRAP值。

$$\text{DPPH清除率}=(A_0-A)/A_0$$

$A$ 为样品吸光度值, $A_0$ 为不加样品吸光度值

$$\text{FRAP值}=(A-A_0)/(A_{\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}}-A_0)\times 500$$

$A$ 为样品吸光度值, $A_{\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}}$ 为 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 吸光度值, $A_0$ 为不加样品吸光度值

## 2.9 基因表达水平测定

**2.9.1 总RNA提取和cDNA合成** 采用试剂盒(DP419,天根有限公司)提取根中总RNA,用1.0%琼脂糖凝胶电泳检测RNA样品完整性,并用超微量分光光度计检测浓度和纯度。采用FastKing RT kit试剂盒(KR116,天根有限公司)对RNA进行反转录,反应体系为20 $\mu\text{L}$ ,反应程序为42 $^\circ\text{C}$ 、15min,95 $^\circ\text{C}$ 、3min,1个循环。

**2.9.2 引物设计和qRT-PCR检测** 参照Su等<sup>[8]</sup>筛选的与阿魏酸、黄酮类、挥发油、多糖类化合物生物合成相关的20个基因及其引物序列(表2),引物由北京擎科生物科技股份有限公司合成。采用SuperReal PreMix Plus(SYBR Green)试剂盒(FP205,天根有限公司)进行qRT-PCR检测,反应程序:95 $^\circ\text{C}$ 、15min,95 $^\circ\text{C}$ 、10s,60 $^\circ\text{C}$ 、20s,72 $^\circ\text{C}$ 、30s,40个循环和95 $^\circ\text{C}$ 、15s进行溶解曲线分析。以白光作为对照,Actin( $ACT$ )作为内参基因<sup>[22]</sup>,利用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算基因表达水平<sup>[23]</sup>。

## 2.10 统计与分析

每个实验重复3次,采用SPSS 20.0进行One-way ANOVA Duncan数据差异性分析,Origin 2021制图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同光质对植株生长特性和叶绿素含量影响

如表3所示,不同光质处理对当归植株生长特性和叶绿素含量具有显著影响。与CK(白光)相

表 2 qRT-PCR 检测引物序列

Table 2 Sequences of primer used for qRT-PCR determination

蛋白名称	基因	引物序列 (5'→3')	扩增片段/bp
肌动蛋白	<i>ACT</i>	正向:ATCCTCCGTCCTTGACCTTGC 反向:ACGATTTCCCGTTCTGCTGT	104
苯丙氨酸解氨酶 2	<i>PAL2</i>	正向:TCAACGGTGAACCTCCATCCC 反向:GCATCAATGGGTAGGTTGCG	117
4-香豆酸-CoA 连接酶样 6	<i>4CLL6</i>	正向:ACTCACTTCCCGTTGTACC 反向:GCAGCACCACATGAAACCTG	107
羟基肉桂酰转移酶 4	<i>HCT4</i>	正向:TTGCACTAGGATGTGGGGTG 反向:CACTGGAGTAGGTGGATCGC	158
咖啡酸 3-O-甲基转移酶	<i>COMT</i>	正向:TTATCCTGGTGTGGAGCACG 反向:AATGTGCATCGCTCCAATCG	104
咖啡酰辅酶 A O-甲基转移酶	<i>CCOMT</i>	正向:GAGCCAGCTGATGCTCCTATG 反向:CAGGGTAACTCCATCACCCAC	132
α-半乳糖苷酶 2	<i>AGAL2</i>	正向:GTATCAACCGGACTTGCTGC 反向:GAAATGTTGAGCGTCTGGGC	112
半乳糖醇合酶 1	<i>GOLS1</i>	正向:TACGGCAATGTGGACGAAC 反向:GGGCATTGTTGGCAGTAACC	119
碱性/中性转化酶 A	<i>INVA</i>	正向:TGTTGAGGGAAGCGGTTGTT 反向:GCAGACGGAACAAAATCCCC	124
蔗糖合酶 2	<i>SUS2</i>	正向:TGTGGAAGCCATGACCTGTG 反向:GCCATGAGATCAGCAGCCTT	132
α,α-海藻糖磷酸合酶[UDP 生成型]5	<i>TPS5</i>	正向:AGCGAGTTACATTTGGCCTT 反向:TCAACCCCAAGCAACACAGT	172
查耳酮合酶 2	<i>CHS2</i>	正向:CCGGATCTATCCCTTGAGCG 反向:GTAAGGCCCACTTCACGGAG	110
查耳酮-黄烷酮异构酶 2	<i>CHI2</i>	正向:CAAATTTTCTCCGGGCTCC 反向:AGTCCAGTACTGCTTCTGCC	144
黄酮醇合酶/黄烷酮 3-羟化酶	<i>FLS1</i>	正向:ACCACCGAACTACCGTGAAC 反向:ATGAGCTTTGAGAGGGGTCC	100
UDP-葡萄糖类黄酮 3-O-葡萄糖基转移酶 6	<i>GT6</i>	正向:TTTACGACTGGTGGAGCGAC 反向:TCCGCTGAGTTCCAATGCTT	168
二氢黄酮醇 4-还原酶	<i>DFRA</i>	正向:ACAGCACTATCACCGCTCAC 反向:ATGTATCTTCCCTGCGCTGT	134
亚麻酸 13S-脂氧合酶 3-1	<i>LOX3.1</i>	正向:TGCTGATGGCGTTATCGAGT 反向:TCTGGTACTGCCATTCCCCT	138
9-顺式-环氧类胡萝卜素双加氧酶	<i>NCEDI</i>	正向:TGCCACCGTCTTCCAGTTAC 反向:AGTGATGCTCTGCAGTTGGT	103
醇脱氢酶 P 类	<i>ADH1</i>	正向:AGGTTGACCCGCAAATTCCT 反向:GCAACCGCTAACCCAATCAC	148
12-氧代植物二烯酸还原酶 3	<i>OPR3</i>	正向:CACTACCGTCAGGCTGCAAT 反向:CCACCATACTCGTCTGTGCG	131
1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸合酶	<i>DXS</i>	正向:CAGAGCTGGGCTAGTTGGAG 反向:TCTACGCCAATCCCCGTTTCC	198

表 3 不同光质对当归植株生长特性和叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of different light qualities on growth characteristics and chlorophyll content of *A. sinensis*

生长参数	株高/cm	根长/cm	地上干质量/g	地下干质量/g	叶绿素(a+b)含量/(mg·g <sup>-1</sup> )
CK (白光)	24.67±2.84 <sup>c</sup>	9.55±2.11 <sup>b</sup>	0.21±0.05 <sup>ab</sup>	0.25±0.45 <sup>a</sup>	1.94±0.06 <sup>b</sup>
红光	20.51±3.69 <sup>d</sup>	9.11±2.37 <sup>b</sup>	0.24±0.09 <sup>a</sup>	0.21±0.06 <sup>a</sup>	1.39±0.04 <sup>c</sup>
蓝光	31.77±3.56 <sup>a</sup>	11.88±2.87 <sup>a</sup>	0.22±0.14 <sup>ab</sup>	0.21±0.08 <sup>a</sup>	1.98±0.04 <sup>a</sup>
红外光	28.05±2.81 <sup>b</sup>	9.26±2.03 <sup>b</sup>	0.15±0.05 <sup>b</sup>	0.19±0.10 <sup>a</sup>	1.29±0.06 <sup>d</sup>

不同小写字母表示同一生长参数不同光质处理在  $P < 0.05$  水平下达到显著性差异。

Different lowercase represents a significant difference among different light qualities treatments at  $P < 0.05$  for the same growth parameters.

比, 蓝光显著促进株高、根长和叶绿素 (a+b) 含量, 分别增加了 1.28、1.24 和 1.02 倍, 但是地上干质量降低, 地下干质量没有达到显著差异水平; 红光处理下株高、叶绿素 (a+b) 含量显著下降, 地上干质量显著增加, 地下干质量、根长无显著差异;

红外光显著促进株高, 但是地上干质量、地下干质量和叶绿素 (a+b) 含量显著下降, 根长无显著差异。以上结果表明, 尽管单色蓝光或红外光在一定程度上可促进某一生长参数, 但是不利于当归植株干物质积累。

### 3.2 不同光质对叶片组织结构影响

如图 2 所示, 不同光质处理对叶片组织结构具有显著影响。与 CK (白光) 相比, 蓝光处理下叶片厚度增加了 1.08 倍, 海绵组织细胞体积较大, 叶绿体数目较多; 但红光和红外光处理降低了 37.45% 和 44.30%, 海绵组织细胞体积较小, 叶绿体数量较少 (图 2-A~D)。与 CK (白光) 相比, 蓝光处理气孔开度增加了 1.13 倍, 红光和红外光处理降低了 17.01% 和 10.73% (图 2-E~L)。以上结果表明, 蓝光有利于叶片生长和光合作用, 红光和红外光相反。

### 3.3 不同光质对阿魏酸和藁本内酯含量影响

由图 3 所示, 不同光质处理对阿魏酸和藁本内酯含量具有显著影响。与 CK (白光) 相比, 红外光显著促进阿魏酸和藁本内酯积累, 分别增加了 1.33 和 1.16 倍, 但红光、蓝光不利于阿魏酸和藁本内酯积累, 分别降低了 9.46%、35.41% 和 18.91%、27.54%。以上结果表明, 红外光有利于当归阿魏酸和藁本内酯积累。

### 3.4 不同光质对其他活性物质积累影响

由图 4 所示, 不同光质处理对其他活性物质 (可

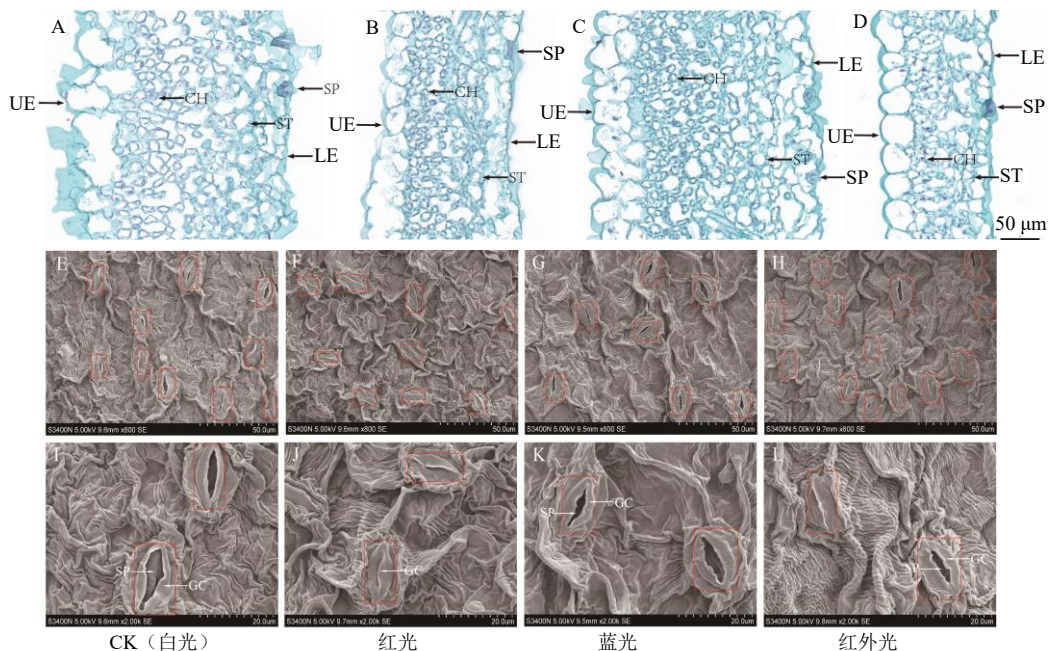
溶性糖、总黄酮和总酚类) 积累具有显著影响。与 CK (白光) 相比, 红光显著促进可溶性糖含量积累, 增加了 1.11 倍, 总黄酮含量降低了 16.70%, 总酚含量增加, 但未达到显著差异水平; 蓝光显著促进总黄酮含量积累, 增加了 1.12 倍, 但可溶性糖和总酚含量降低了 6.17% 和 19.49%; 红外光显著促进总酚含量积累, 增加了 1.34 倍, 但可溶性糖含量显著降低, 总黄酮含量无显著差异。以上结果表明, 红光有利于可溶性糖积累、蓝光有利于总黄酮积累、而红外光有利于总酚类积累。

### 3.5 不同光质对体外抗氧化力影响

由图 5 所示, 不同光质处理对当归根提取液体外抗氧化能力具有显著影响。与 CK (白光) 相比, 红外光显著提高 DPPH 抑制率和 FRAP 值, 分别增加了 1.53 和 1.23 倍, 红光和蓝光 DPPH 抑制率和 FRAP 值有所下降。以上结果表明, 红外光显著促进当归根提取液的体外抗氧化能力。

### 3.6 不同光质对阿魏酸生物合成关键基因表达水平影响

如图 6 所示, 不同光质处理对阿魏酸生物合成 5 个关键基因表达水平具有显著影响。与 CK (白

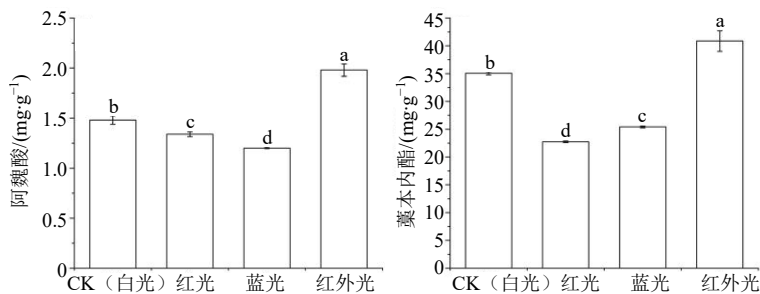


UE-上表皮; Ch-叶绿体; ST-海绵组织; SP-气孔; LE-下表皮; GC-保卫细胞。A、E 和 I 表示对照 (白光) 处理; B、F 和 J 表示红光处理; C、G 和 K 表示蓝光处理; D、H 和 L 表示红外光处理。

UE-upper epidermis; Ch-chloroplast; ST-spongy tissue; SP-stomatal pore; LE-lower epidermis; GC-guard cell. Images A, E and I represent the white light (CK) treatment; Images B, F and J represent the red light treatment; Images C, G and K represent the blue light treatment; Images D, H and L represent the infrared light treatment.

图 2 不同光质对当归叶片组织结构影响

Fig. 2 Effects of different light qualities on leaf tissue structure of *A. sinensis*



不同小写字母表示不同光质处理在  $P < 0.05$  水平下达到显著性差异，下同。

Different lowercase represents a significant difference among different light qualities treatments at  $P < 0.05$ , same as below.

图3 不同光质对当归阿魏酸和藁本内酯含量影响

Fig. 3 Effects of different light qualities on contents of ferulic acid and ligustilide in *A. sinensis*

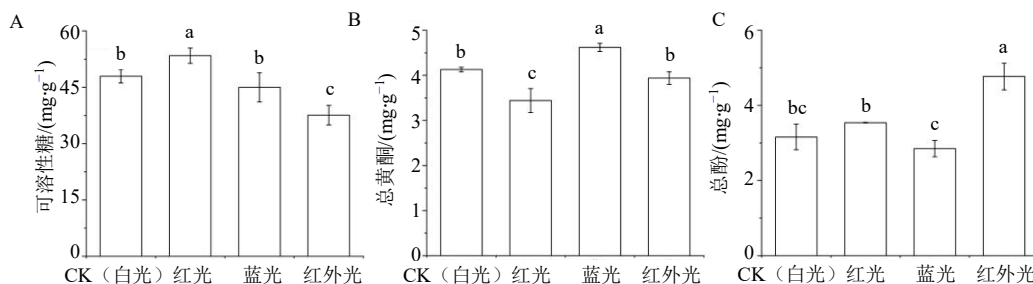


图4 不同光质对可溶性糖 (A)、总黄酮 (B) 和总酚 (C) 积累影响

Fig. 4 Effect of different light qualities on on accumulation of soluble sugars (A), total flavonoids (B), and total phenols (C) in *A. sinensis*

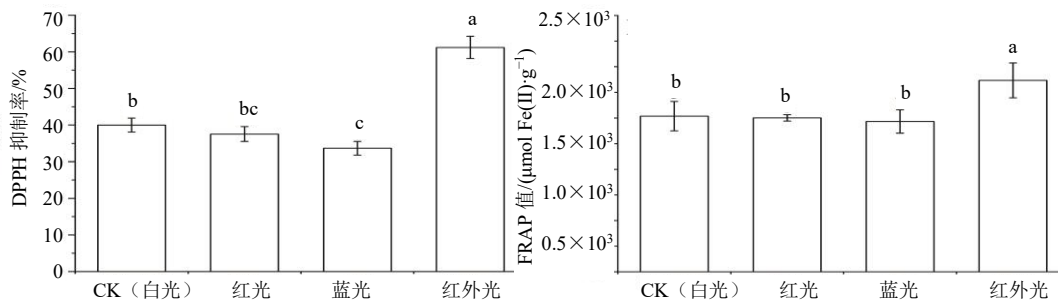


图5 不同光质对体外抗氧化力影响

Fig. 5 Effect of different light qualities on *in vitro* antioxidant capacity of *A. sinensis*

光)相比,红光显著促进 *PAL2* (16.57)、*4CL16* (4.695 倍)、*HCT4* (2.85) 和 *COMT* (4.19) 表达,抑制了 *CCOMT* (0.89) 表达;蓝光和红外光对以上 5 个基因表达均呈现促进作用。同时,与白光(对照)相比,红光、蓝光和红外光之间,不同基因表达调控存在较大差异,比如, *PAL2* 表达上调在红光处理最为显著, *COMT* 表达上调在蓝光处理最为显著, *CCOMT* 表达上调在红外光处理最为显著。以上结果表明,不同光质可促进阿魏酸生物合成途径中的关键基因表达水平,但不同光质之间的调控水平存

在较大差异。

### 3.7 光质处理对多糖生物合成关键基因表达水平影响

如图 7 所示,不同光质处理对多糖生物合成 5 个关键基因表达水平具有显著影响。与 CK (白光)相比,蓝光处理下显著促进 *GOLS1* (6.68)、*INVA* (1.27)、*SUS2* (3.32)、*TPS5* (8.46),抑制 *AGAL2* (0.42) 表达,其中,红光、红外光对多糖生物合成关键基因表达水平均呈现促进作用, *GOLS1* 和 *TPS5* 最为显著,在红外光处理下相对表达量分别高达 11.34 和 14.13。

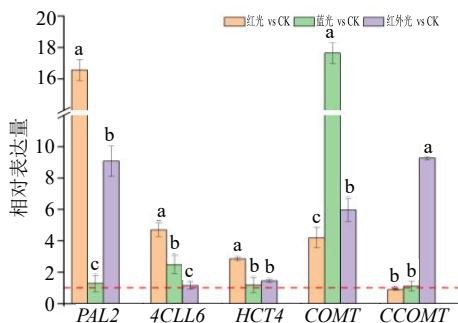


图6 不同光质对阿魏酸生物合成关键基因表达水平影响  
Fig. 6 Effect of different light qualities on expression level of genes involved in ferulic acid biosynthesis in *A. sinensis*

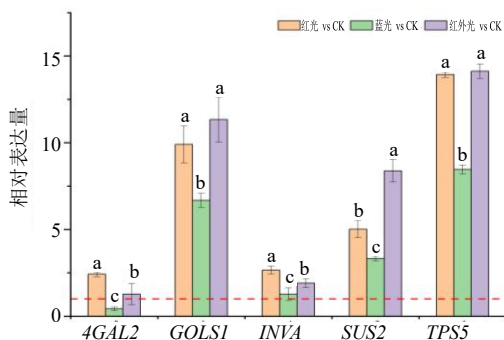


图7 不同光质对多糖生物合成关键基因表达水平影响  
Fig. 7 Effect of different light qualities on expression level of genes involved in polysaccharides biosynthesis in *A. sinensis*

### 3.8 不同光质对黄酮类生物合成关键基因表达水平影响

如图8所示,不同光质处理对黄酮类生物合成5个关键基因表达水平具有显著影响。与CK(白光)相比,红光显著促进CHS2(17.57)、CHI2

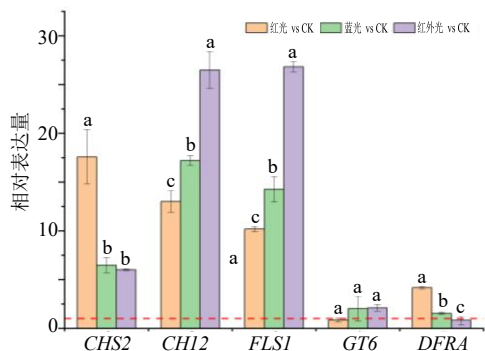


图8 不同光质对黄酮类生物合成关键基因表达水平影响  
Fig. 8 Effect of different light qualities on expression level of genes involved in flavonoids biosynthesis in *A. sinensis*

(13.01)、FLS1(10.17)、DFRA(4.17)表达,抑制了GT6(0.84)基因表达;蓝光显著促进以上5个基因表达,其中,CHI2和FLS1表达上调最为显著,相对表达量分别达到17.20和14.26;红外光抑制了DFRA(0.82)基因表达,促进了其余4个基因表达。以上结果表明,红光、蓝光和红外光对黄酮类生物合成关键基因表达具有较大差异,例如DFRA表达上调在红光、蓝光处理下最为显著,红外光处理下显著抑制。

### 3.9 不同光质对挥发油生物合成关键基因表达水平影响

如图9所示,不同光质处理对挥发油生物合成5个关键基因表达水平具有显著影响。与CK(白光)相比,红光显著促进DXS(12.97)表达,抑制了LOX3.1(0.695)、NCEDI(0.268)、ADHI(0.082倍)、OPR3(0.132)基因表达;蓝光处理下,抑制了OPR3(0.543)表达,促进了其他4个基因表达;红外光处理下,抑制了NCEDI(0.558)表达,促进了其他4个基因表达。以上结果表明,红光、蓝光和红外光对挥发油生物合成关键基因表达具有较大差异,例如NCEDI表达上调在蓝光处理下最为显著,红光和红外光处理下显著抑制。

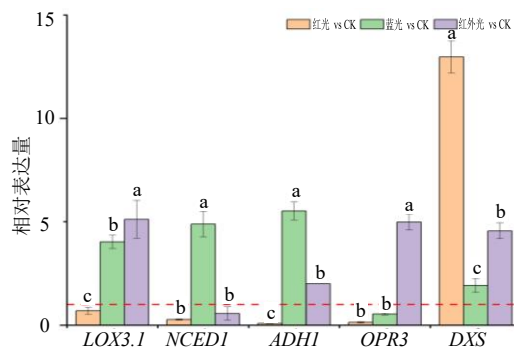


图9 不同光质对挥发油生物合成关键基因表达水平影响  
Fig. 9 Effect of different light qualities on expression level of genes involved in volatile oil biosynthesis in *A. sinensis*

## 4 讨论

光质可通过影响植物光合作用、形态建成、代谢产物积累、基因表达等关键生理生化过程,实现对植物生长发育和代谢产物生物合成的调控。本研究通过对当归进行不同光质(红光、蓝光和红外光)处理,发现不同光质对植株生长特性、主要活性物质积累和关键基因表达存在特异性效应。

光质影响植物叶片发育、生物量分配及光合生理特征,且不同光质对不同植物生长的调控存在较大

差异；比如，红光可促进贯叶金丝桃生长发育（如鲜质量和干质量、叶面积和叶数、花数量和直径等）<sup>[24]</sup>，蓝光可促进西洋参地上部生物量积累<sup>[25]</sup>，远红光可促进罗勒植株节间茎秆伸长和地上部分生物量积累<sup>[26]</sup>。前人对当归研究发现，UV-B抑制植株株高、根长、叶片厚度、生物量、叶绿素含量、叶绿体和线粒体数量、气孔密度、气孔开度等<sup>[8]</sup>，遮阳50%~75%有利于产量形成<sup>[7]</sup>。本研究发现，蓝光显著促进当归植株株高、根长、叶绿素含量、气孔开度，红光和红外光在一定程度上可促进某一生长参数（如株高和地上干质量），但蓝光、红光和红外光对生物量积累不显著。有研究发现，复合光促进植物生长和生物量积累更加显著；比如，红光/蓝光2:1可促进重楼叶绿素含量和地上部分生物量<sup>[27]</sup>，红光/蓝光1:2可促进石斛光合作用<sup>[28]</sup>，红光/蓝光3:2可增加番红花气孔开度、叶绿素含量、净光合速率等<sup>[29]</sup>。

光质不仅影响植物生长和发育，还调控初级和次级代谢产物积累；比如，红光可促进贯叶金丝桃地上部分金丝桃素、伪金丝桃素、贯叶金丝桃素积累<sup>[24]</sup>，白光可促进川贝母愈伤组织总黄酮积累<sup>[30]</sup>，远红光可促进罗勒叶片花青素、总酚和总黄酮积累及抗氧化能力<sup>[26]</sup>。前人对当归研究发现，白光（100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ ）+UV-B（107  $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ）有利于植株阿魏酸、藁本内酯、总黄酮、多糖类等化合物积累<sup>[8]</sup>，遮阳50%~75%有利于阿魏酸积累<sup>[7]</sup>。本研究发现，红光显著促进可溶性糖积累，蓝光显著促进总黄酮积累，而红外光显著促进阿魏酸、藁本内酯、总酚类积累和体外抗氧化能力。有研究发现，复合光促进植物代谢产物积累更加显著；比如，红光/蓝光2:1可促进重楼根茎中总多糖积累<sup>[27]</sup>，红光/蓝光1:2可促进石斛中淀粉、多糖、总黄酮等化合物积累<sup>[28]</sup>，红光/蓝光1:1可促进黄花蒿抗坏血酸和半萜积累及DPPH抑制率<sup>[31]</sup>。

光质通过调控相关基因表达影响植物生长和发育及代谢产物生物合成<sup>[32]</sup>。比如，蓝光可调控4CL3、CHS2和ANS等基因过表达促进箭叶淫羊藿中淫羊藿苷和淫羊藿苷II生物合成<sup>[33]</sup>，红光可抑制CRY-DASH和UVR3基因表达减少积雪草中黄酮类次级代谢物合成<sup>[34]</sup>，UV-B可调控GPX、POD5和POD7等抗氧化酶基因过表达促进宽叶紫衫中活性氧合成<sup>[35]</sup>。前人对当归研究发现，白光（150  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ ）+UV-B（107  $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ）可调控相关基因（如CCOMT、ANS、BEAT和INVA等）过表达促进阿魏

酸、黄酮类、挥发油及多糖类代谢产物生物合成<sup>[8]</sup>。本研究发现，不同光质调控阿魏酸、黄酮类、挥发油及多糖类生物合成相关基因表达水平存在较大差异；其中，蓝光显著促进COMT表达，红光显著促进CHS2表达，而红外光显著促进CCOMT、GOLS1和LOX3.1等表达。有研究发现，复合光促进相关基因表达上调更加显著，比如，红光/蓝光1:2可调控PAL、COMT和 $\beta$ -Glucosidase等基因过表达促进石斛中淀粉、多糖、总黄酮等化合物生物合成<sup>[28]</sup>，红光/蓝光2:3可调控CCOMT、CHI和4CL等基因过表达促进叠鞘石斛中黄酮类、多糖、酚类等化合物生物合成<sup>[36]</sup>，红光/蓝光3:1可调控PAL、4CL和CHI等基因过表达促进落叶松中紫杉叶素生物合成<sup>[37]</sup>。

以上研究结果表明，通过不同单色光质（白光、蓝光、红光和红外光）对当归植株生长特性（如生物量、叶绿素含量和气孔开度等）、代谢产物（如阿魏酸、藁本内酯和黄酮类等）积累及相关基因（如COMT、TPS5和CHS2等）表达水平存在较大差异，该研究结果将对通过调控光质促进当归植株生长和代谢产物积累提供重要参考，但对复合光影响当归植株生长、代谢产物积累及相关基因表达水平还需要进一步研究。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 156.
- [2] 赵静, 夏晓培. 当归的化学成分及药理作用研究现状 [J]. 临床合理用药杂志, 2020, 13(6): 172-174.
- [3] 马艳春, 吴文轩, 胡建辉, 等. 当归的化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中医学报, 2022, 50(1): 111-114.
- [4] 栗孟飞, 刘学周, 魏建和, 等. 基于生物量、活性物质积累和抗氧化能力的当归高海拔种植区域选择 [J]. 中草药, 2020, 51(2): 474-481.
- [5] 夏权. 环境因子对当归药用成分形成的影响研究进展 [J]. 南方农机, 2022, 53(21): 26-28.
- [6] Dong H, Li M L, Jin L, et al. Cool temperature enhances growth, ferulic acid and flavonoid biosynthesis while inhibiting polysaccharide biosynthesis in *Angelica sinensis* [J]. *Molecules*, 2022, 27(1): 320.
- [7] 向红, 李炆, 金尧. 光照强度对当归产量及阿魏酸含量的影响 [J]. 中兽医医药杂志, 2015, 34(2): 53-54.
- [8] Su H Y, Cui X W, Zhao Y, et al. Light-regulated growth, anatomical, metabolites biosynthesis and transcriptional changes in *Angelica sinensis* [J]. *Plants*, 2024, 13(19): 2744.
- [9] 王振恒, 王引权, 樊秦, 等. 紫外线-B辐射对当归苯酞类成分含量的影响 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2019, 36(6): 31-34.

- [10] Wang X X, Fu X L, Chen M, *et al.* Ultraviolet B irradiation influences the fruit quality and sucrose metabolism of peach (*Prunus persica* L.) [J]. *Environ Exp Bot*, 2018, 153: 286-301.
- [11] 雒军, 王引权, 吴国泰, 等. 当归根部中主要有效成分的动态积累和转化研究 [J]. *中草药*, 2021, 52(21): 6663-6668.
- [12] 刘迪, 崔秀文, 黄天苗, 等. 当归抽薹开花过程中赤霉素代谢水平及其关键酶基因克隆与表达分析 [J]. *中草药*, 2023, 54(1): 222-234.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 58.
- [14] Huang T M, Liu D, Cui X W, *et al.* *In vitro* bioactive metabolite production and plant regeneration of medicinal plant *Angelica sinensis* [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 194: 116276.
- [15] 杨国一, 于文涛, 蔡春平, 等. 茶叶叶片扫描电镜样品制备方法的比较研究 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(3): 95-98.
- [16] Deng X Q, Guan X J, Huang N N, *et al.* Simultaneous determination of eight constituents in *Angelica sinensis* by HPLC [J]. *Chin Tradit Patent Med*, 2020, 42(8):2075-2079.
- [17] 栗孟飞, 姚园园, 杨林贵, 等. 狭叶红景天引种驯化后抗氧化能力、主要活性物质含量及挥发性组分的变化 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2947-2954.
- [18] Lay M M, Karsani S A, Mohajer S, *et al.* Phytochemical constituents, nutritional values, phenolics, flavonols, flavonoids, antioxidant and cytotoxicity studies on *Phaleria macrocarpa* (Scheff.) Boerl fruits [J]. *BMC Complement Altern Med*, 2014, 14: 152.
- [19] Beato V M, Orgaz F, Mansilla F, *et al.* Changes in phenolic compounds in garlic (*Allium sativum* L.) owing to the cultivar and location of growth [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2011, 66(3): 218-223.
- [20] Nencini C, Menchiari A, Franchi G G, *et al.* *In vitro* antioxidant activity of aged extracts of some Italian *Allium* species [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2011, 66(1): 11-16.
- [21] Benzie I F, Strain J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay [J]. *Anal Biochem*, 1996, 239(1): 70-76.
- [22] 朋冬琴, 罗蜜蜜, 郭欣慰, 等. 当归实时荧光定量 PCR 内参基因筛选 [J]. *中草药*, 2024, 55(1): 269-278.
- [23] Willems E, Leyns L, Vandesompele J. Standardization of real-time PCR gene expression data from independent biological replicates [J]. *Anal Biochem*, 2008, 379(1): 127-129.
- [24] Karimi M, Ahmadi N, Ebrahimi M. Red LED light promotes biomass, flowering and secondary metabolites accumulation in hydroponically grown *Hypericum perforatum* L. (cv. Topas) [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 175: 114239.
- [25] 刘紫祺. 不同光照条件对西洋参生长、皂苷合成及病害发生的影响 [D]. 北京: 中国医学科学院, 2022.
- [26] 窦海杰, Niu G H, Gu M M, 等. 远红光有效促进罗勒植株的生物量和叶片花青素、总酚及类黄酮的积累 [J]. *中国蔬菜*, 2022, 15(5): 81-88.
- [27] 李铂, 唐志书, 王楠, 等. 不同LED光质对陕产重楼生理特性和成分积累的影响 [J]. *中国现代中药*, 2019, 21(10): 1386-1391.
- [28] Li X B, Yang K G, Ma J, *et al.* Transcriptome analysis reveals different red and blue light duration promote growth and main medicinal ingredients of *Dendrobium nobile* Lindl [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 204: 117347.
- [29] Zhou T, Qiu X, Zhao L, *et al.* Optimal light intensity and quality increased the saffron daughter corm yield by inhibiting the degradation of reserves in mother corms during the reproductive stage [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 176: 114396.
- [30] Zhang Z, Xing C Y, Su H Y, *et al.* *In vitro* plant regeneration and bioactive metabolite production of endangered medicinal plant *Fritillaria cirrhosa* [J]. *Curr Plant Biol*, 2024, 39: 100363.
- [31] Rai N, Ansari N, Apoorva, *et al.* Red and blue light-mediated physiological and metabolic insights in *Artemisia annua* L. [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 222: 119879.
- [32] Zhu T T, Guan G, Huang L L, *et al.* Transcriptomic and metabolomic analysis reveal the effects of light quality on the growth and lipid biosynthesis in *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Biomolecules*, 2024, 14(9): 1144.
- [33] Yang L L, Zhou S W, Hou Y W, *et al.* Blue light induces biosynthesis of flavonoids in *Epimedium sagittatum* (Sieb. et Zucc.) Maxim. leaves, a study on a light-demanding medicinal shade herb [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 187: 115512.
- [34] Nawae W, Yoocha T, Narong N, *et al.* Transcriptome sequencing revealed the influence of blue light on the expression levels of light-stress response genes in *Centella asiatica* [J]. *PLoS One*, 2021, 16(11): e0260468.
- [35] Jiao J, Xu X J, Lu Y, *et al.* Identification of genes associated with biosynthesis of bioactive flavonoids and taxoids in *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. plantlets exposed to UV-B radiation [J]. *Gene*, 2022, 823: 146384.
- [36] Xu E Y, Liu Y Y, Guo L, *et al.* Transcriptional analysis reveals new insights into the different light intensities of red and blue light on the growth and synthesis of medicinal ingredients in *Dendrobium denneanum* [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 210: 118065.
- [37] Song X Q, Jin L, Guan X, *et al.* Comprehensive multi-omics analysis reveals regulatory mechanisms of red and blue light combination on phenolic metabolite accumulation in larch [J]. *Ind Crops Prod*, 2025, 225: 120526.

[责任编辑 时圣明]